基于颗粒流的新老混凝土加固构件轴压性能细观研究

姜仲洋[1],李志华[1],张聪[1,2]

(1. 江南大学环境与土木工程学院,214122 无锡;2. 绿色建筑材料国家重点实验室,100024 北京)

摘　要:考虑到混凝土是一种非均质材料,为研究新老混凝土界面黏结特性和破坏机理,利用PFC3D 细观离散元软件对新老混凝土黏结试块双面剪切性能和增大截面法加固钢筋混凝土构件轴压力学性能进行数值研究。结果表明,对于双面剪切试验,新老混凝土剪切-位移数值曲线与试验曲线基本一致,模型接触断裂主要发生在新老混凝土界面处,裂缝数量随着模型达到峰值后急剧上升,在界面处形成贯通的断裂面;在轴压试验模拟中,轴压力、混凝土应变关系数值曲线与试验结果吻合较好,数值结果能较好地预测软化阶段,模型中接触断裂主要发生在柱中部及下部位置,与实际破坏模式相符。

关键词:离散元法;新老混凝土;界面破坏;细观;加固

中图分类号:TU317　　　　**文献标志码:**A

Meso-study on the axial compression performance of new and old concrete reinforced members based on particle flow

JIANG Zhongyang[1], LI Zhihua[1], ZHANG Cong[1,2]

(1. School of Environment & Civil Engineering, Jiangnan University, 214122 Wuxi, China;
2. State Key Laboratory of Green Building Materials, 100024 Beijing, China)

Abstract: Considering that concrete is a kind of heterogeneous material, in order to study the interfacial bonding characteristics and failure mechanism of new and old concrete, PFC3D mesoscopic discrete element software was used to simulate the double-sided shear performance of new and old concrete specimens and the axial compression mechanical properties of reinforced concrete members strengthened by increasing section method. The results showed that in the double-sided shear test, the numerical curve of shear displacement of new and old concrete is basically consistent with the test curve, the contact fracture of the model mainly occurs at the interface of new and old concrete, and the number of cracks increases sharply after the model reaches the peak value, and a transfixed fracture surface is formed at the interface. In the simulation of axial compression test, the numerical curve of the relationship between axial compression and concrete strain is consistent with the experimental curve, and the numerical simulation can well predict the

收稿日期:2021-01-20　　　**修回日期:**2022-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目((No. 51908247);江苏省自然科学基金资助项目((No. BK20170192);绿色建筑材料国家重点实验室开放基金资助项目((No. YA-616)

通信作者:李志华,博士,副教授。E-mail:lizh@jiangnan.edu.cn

引用格式:姜仲洋,李志华,张聪. 基于颗粒流的新老混凝土加固构件轴压性能细观研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):342-349.

JIANG Zhongyang, LI Zhihua, ZHANG Cong. Meso-study on the axial compression performance of new and old concrete reinforced members based on particle flow[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):342-349.

softening stage. The contact fracture mainly occurs in the middle and lower parts of the column, which is consistent with the actual failure mode.

Key words: discrete element method; new and old concrete; interface failure; mesoscopic; reinforcement

关于混凝土的数值模拟研究已展开许多研究工作,采用基于连续介质力学的有限元方法虽然能够在一些条件下满足精度要求,但不能描述颗粒间的复杂相互作用及高度非线性行为,亦无法正确刻画材料的流动变形特征。

颗粒流(particle flow code, PFC)[1-2]是一种细观离散元软件,它通过模拟圆形颗粒介质的运动及相互作用来研究颗粒介质特性。PFC 通过颗粒单元构造试样几何形状、接触本构关系形成相互作用、迭代分析法更新颗粒的状态,最终使得数值试样的宏观力学特性逼近真实材料的力学特性,并且呈现可视化的结果。PFC 基于非连续介质力学理论设计,有着适合混凝土材料的本构接触模型,并且对介质的开裂、分离等非连续现象有较好的模拟效果,在混凝土领域有着较好的应用前景。张正珺等[3]模拟了二维混凝土单轴压缩破坏全过程,探讨了数值试验中应力-应变曲线及体积应变的变化规律,分析了颗粒尺寸、颗粒数目等细观参数对模拟结果的影响;许尚杰等[4]进行了单级配和全级配单轴压缩试验二维离散元模拟,得出骨料空间位置和数量、大小均会影响混凝土的抗压性能;赵全满等[5]利用 PFC2D 对混凝土抗压强度进行了细观数值模拟,分析细观参数对弹性模量和抗压强度的影响,通过校核确定细观参数并以此为基础进行抗拉和抗剪试验模拟;此外,张炜等[6]利用 PFC2D 探究双轴压缩过程中颗粒物质接触力和力链特性,通过接触力大小、角度分布规律等细观层次分析来实现对力链方向性的量化描述。上述研究均基于二维离散元模拟;但实际混凝土的裂缝发生、扩展都是三维的,若将混凝土试件破坏过程看成是二维平面问题,则不能真实反映混凝土试件复杂的应力应变关系。此外,通过有限元方法解决新老混凝土界面黏结[7-9]问题并不理想,例如混凝土与混凝土界面在剪力和弯矩组合作用下的力学性能和破坏形态、新旧混凝土锚固钢筋混凝土模型的破坏模式、界面剪切滑移等,而细观离散元方法为该问题提供了解决的可能性;但是目前相关的研究依然匮乏。

文献[10-11]分别利用 PFC3D 软件研究了不同孔隙率下无砂混凝土单轴压缩下的受力及破坏情况和端部摩擦对不同形状混凝土抗压强度、变形和破坏模式的影响。本研究首先采用 PFC3D 离散元软件对新老混凝土黏结试块双面剪切试验进行数值模拟,并与试验数据进行对比,从细观角度研究其力学特性、裂缝演化过程和分布规律,以验证离散元方法对于界面问题的适用性。然后,对增大截面法加固钢筋混凝土轴压试验进行数值模拟,并与现有数据进行对比,分析了新老混凝土界面的受力特性与破坏模式。本研究研究成果将对离散元方法在混凝土结构的加固应用提供一定的参考。

1 PFC3D 离散元数值模拟

接触本构是离散元计算方法的关键,能反映微细观介质的力学特性。其中平行黏结模型适用于黏结材料的力学行为(类似于环氧树脂胶合玻璃珠、水泥间骨料的黏结)[12],可视作一组弹簧,均匀分布于接触面与接触点。这些弹簧与线性元件弹簧平行,平行键产生后,接触处发生相对运动,颗粒具有滑动的可能性,平行黏结可以在颗粒之间传递力和力矩[13];当法向应力超过其相应的黏结强度,平行黏结断裂,模型退化为线性模型,此时相互接触颗粒黏结发生断裂形成微损伤,进而扩展成破裂面使试样破坏,这与实际混凝土材料的损伤发展相符[14]。平行黏结接触如图 1 所示。

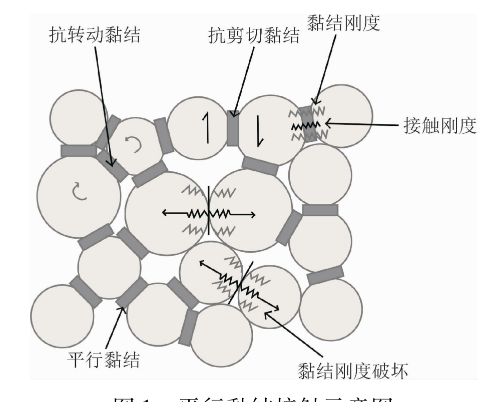


图 1 平行黏结接触示意图

Fig. 1 Parallel bond contact

平行黏结中的力-位移法则满足

$$F_c = F^l + F^d + \bar{F} \tag{1}$$

$$M_c = \bar{M} \tag{2}$$

式中：F^l 为线弹性力；F^d 为阻尼力；$\bar{F}$ 为平行黏结力；$\bar{M}$ 为平行黏结弯矩。其中，线弹性力和阻尼力在线性模型中更新，而平行黏结力和弯矩在平行黏结模型中更新。

平行黏结力分解为法向力和切向力，而平行黏结弯矩由扭矩和弯矩合成。

$$\bar{F} = -\bar{F}_n\hat{n}_c + \bar{F}_s \tag{3}$$

$$\bar{M} = \bar{M}_t\hat{n}_c + \bar{M}_b \tag{4}$$

式中$\bar{F}_n > 0$ 为拉力。平行黏结剪力和弯矩在坐标系可分解为

$$\bar{F}_s = \bar{F}_{ss}\hat{s}_c + \bar{F}_{st}\hat{t}_c \tag{5}$$

$$\bar{M}_b = \bar{M}_{bs}\hat{s}_c + \bar{M}_{bt}\hat{t}_c \tag{6}$$

当平行黏结的联系通过黏结方法被建立，平行黏结力和弯矩初始值为 0。平行黏结模型在两颗球体表面提供相互作用，当黏结发生破坏时，相互作用消失。平行黏结表面间隙可以定义为颗粒体间法向位移增量积累。

$$\bar{g}_s = \sum \Delta\delta_n \tag{7}$$

式中 $\Delta\delta_n$ 为法向位移增量。

2 双面剪切试验

双面剪切试验采用 2/3 体积老混凝土与 1/3 体积新混凝土双面黏结的边长 100 mm 复合立方体试块，试验试块加载情况如图 2 所示。老混凝土采用龄期 180 d、边长 100 mm 的 C30 立方体试块。将试块平均分成 3 等份。对切割后的老混凝土试块采取人工凿毛处理，凿去黏结面的浮浆和部分水泥，形成凹凸不平表面，如图 3 所示。新增混凝土强度等级为 C35，共制备 16 组 48 个试块，标准养护 28 d。试验在 WE-300 型万能试验机上进行，加载速度为 0.05 MPa/s[15]。

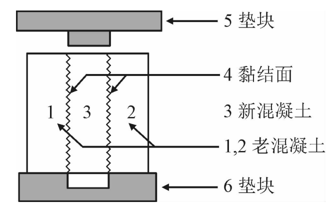


图 2　双面剪切试验示意图

Fig. 2　Double-sided shear test

利用 Fish 语言和 PFC 内置命令制作剪切盒，ball 颗粒填充后删除新老混凝土交界 wall，产生接触条件后静置收敛；随后通过伺服控制促使颗粒位置不断调整，实现区域均匀孔隙率、均匀应力；再赋予接触参数，加载方式以速度加载控制，数值模型如图 4 所示。其中新老混凝土界面粗糙度处理如图 5 所示。建模时首先对混凝土进行分组，wall 左侧为老混凝土，右侧为新混凝土。在交界 wall 移除之前，颗粒有一定的重叠量，紧贴合于 wall。移除 wall，此时颗粒会弹开，计算至平衡，使得原本界面处位置填充满颗粒。此时，原 wall 处新老混凝土颗粒之间有了接触条件，界面分布不规则曲线。新老混凝土颗粒之间颗粒采用线性接触本构。对于 ball 单元生成的模型，通过建模前预设控制参数 emod 来控制粗糙度的大小，数值越大黏结越紧密，说明越粗糙，本研究采用 1 GPa。



图 3　老混凝土凿毛处理

Fig. 3　Roughening of old concrete

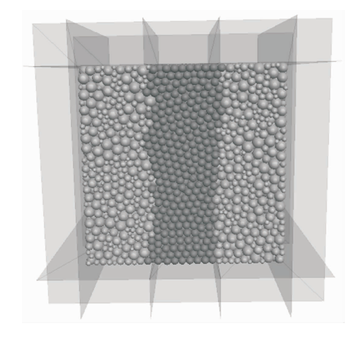


图 4　双面剪切数值模拟示意图

Fig. 4　Double-sided shear numerical simulation

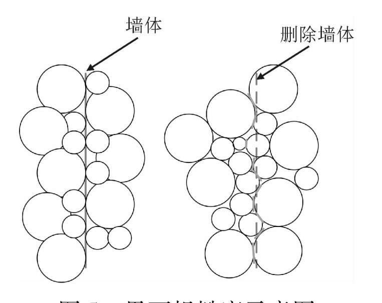


图 5　界面粗糙度示意图

Fig. 5　Interface roughness

2.1　细观力学参数的选取

PFC 的基本思想在很大程度上不同于其他连续

和非连续力学理论方法，导致 PFC 与常规数值方法之间存在一定的差异，模型介质的宏观基本物理力学参数不能直接与颗粒细观的结构参数联系，需要通过数值试验标定程序得到与物理模型宏观力学相对应的细观参数。不同于以往直接对接触刚度 k_n 和 k_s 赋值，由于颗粒形状和粒径的差异，采用有效模量 emod 对不同接触的黏结自动计算其刚度。利用平行黏结线性快速标定法，得出的模型细观参数如表 1 所示。

表 1　双面剪切试件细观参数

Tab. 1　Meso parameters of double-sided shear test

混凝土	有效模量/GPa	刚度比	平行黏结有效模量/GPa	平行黏结法向强度/MPa	平行黏结切向强度/MPa	平行黏结刚度比
老混凝土	5.4	1	5.4	38	38	1
新混凝土	2.5	1	2.5	42	40	1

2.2　剪切滑移曲线

图 6 为新老混凝土黏结试块双面剪切试验曲线与数值曲线的比较。从图 6 中可以看出，试验曲线在位移为 0.25 mm 之前呈线性增长趋势，之后曲线斜率变小，强度逐渐上升，达到峰值后进入软化阶段；而模拟曲线在达到峰值前基本呈线性增长，达到峰值后开始下降，相较于试验曲线软化阶段更为明显，虽然在位移到 0.3 mm 后，模拟剪切强度与试验剪切强度具有一定差异，但是从整体上看，两者差异较小，模拟效果较为理想。

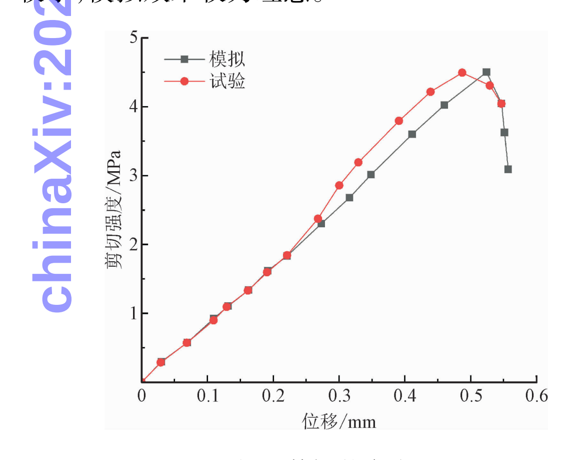


图 6　剪切滑移对比

Fig. 6　Comparison of Shear-slip

图 7 为双面剪切试块的位移云图。从图 7 中可以看出，新混凝土上 1/3 部分毗邻加载面，位移量最大；中下部分位移量递减，底部左右两侧深蓝色区域位移量最小。两侧老混凝土整体位移量差较小，位移较大处集中于中部；界面处由于新老混凝土的位移量差值的大小而表现出不同的颗粒颜色分布，界面上部相差最大，也是初始裂缝最容易出现的地方。位移量差值自上而下逐渐减小，直至下 1/3 段时，右侧界面位移量差值几乎为 0，裂缝不易产生；接近底部深蓝色区域时，位移量差值增大，说明此时裂缝出现的位置会围绕着右侧深蓝色区域。

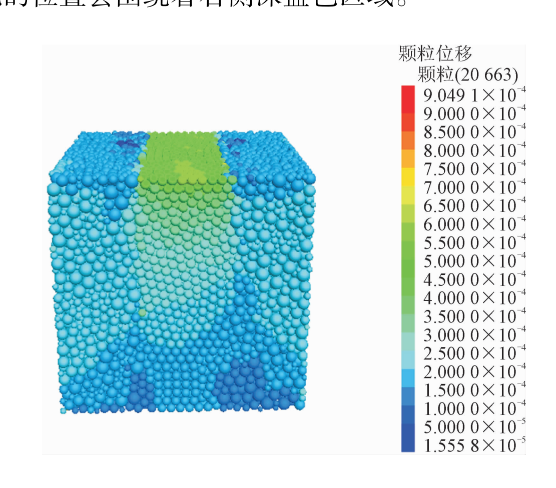


图 7　双剪试块位移云图

Fig. 7　Displacement nephogram of double-sided shear test block

2.3　损伤断裂演化

双面剪切模型裂隙演化过程如图 8 所示。当时步为 5 000 时，新老混凝土上表面交界处及试块四周出现少量的红色圆片状裂隙网格，数量为341；当时步为 10 000 时，裂隙网格集中于加载界面处，数量为 1 181，说明加载处界面优先出现破坏裂缝；当时步为 20 000 时，整个试块中部以上的界面处已布满密集的裂隙网格，数量为 4 490，此时裂缝已进一步扩大；当时步为 30 000 时，左侧交界面处已完全布满裂隙网格，而右侧交界面上 2/3 段裂缝沿着竖直方向拓展，下 1/3 段裂缝向老混凝土一侧偏移，最后又折返于新老混凝土交界处底部，裂隙数量为 12 309。从整体上看，裂缝的形成、扩展发生在新老混凝土界面处[16-18]，说明 PFC3D 对新老混凝土双面剪切界面问题的研究是可行的。

(a) 时步 5 000

(b) 时步 10 000

(c) 时步 20 000

(d) 时步 30 000

图 8　双面剪切模型裂隙演化过程

Fig. 8　Fracture damage evolution of double-sided shear model

图 9 为试件双面剪切破坏图。从图 9 中可以看出,贯通裂缝主要发生于新老混凝土界面处,试块表层还有少许的混凝土脱落。当试验机加载至峰值荷载时,伴随着一声脆响,黏结面出现裂缝,试件随机破坏分离。破坏面较为平直,属于典型的脆性破坏,相较于数值模拟,破坏形态大致吻合。

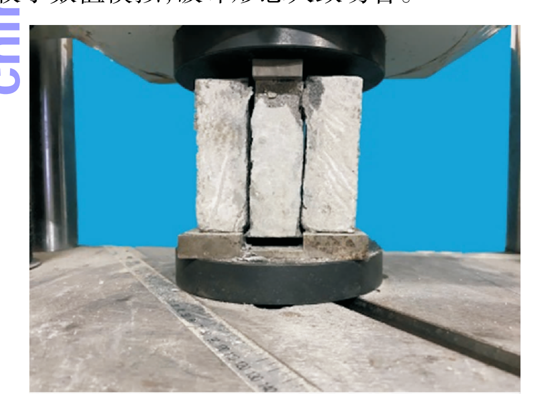


图 9　双面剪切破坏示意图

Fig. 9　Diagram of double side shear failure

3　增大截面法加固钢筋混凝土构件轴压数值模拟

为进一步研究不同加载方式下 PFC3D 对于界面研究方向的可行性,对增大截面法加固钢筋混凝土轴压构件进行数值模拟。试验原柱截面[19]尺寸 200 mm × 200 mm,高 1 000 mm;加固后截面尺寸扩大到 320 mm × 320 mm;纵筋采用直径 14 mm 的 HRB335 级钢筋,箍筋采用直径 6 mm 的 HPB300 级钢筋,间距 150 mm;加固前首先对原柱进行凿毛处理,新老混凝土界面用水泥净浆进行处理。数值模拟中建立内外墙体;采用 Clump 命令填充,与传统的球体颗粒填充相比,通过外部导入方式引进多种几何形状(Geometry 命令)以模拟不规则骨料,更具真实性,如图 10 所示;利用 Fish 语言命令来实现纵筋和箍筋的建模;顶面和底面为刚性墙体以模拟加载板,内外侧面均为自由边界。钢筋混凝土整柱数值模型如图 11 所示。

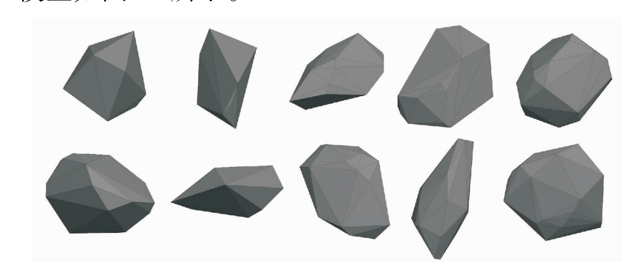


图 10　骨料仿真样式

Fig. 10　Style of aggregate simulation

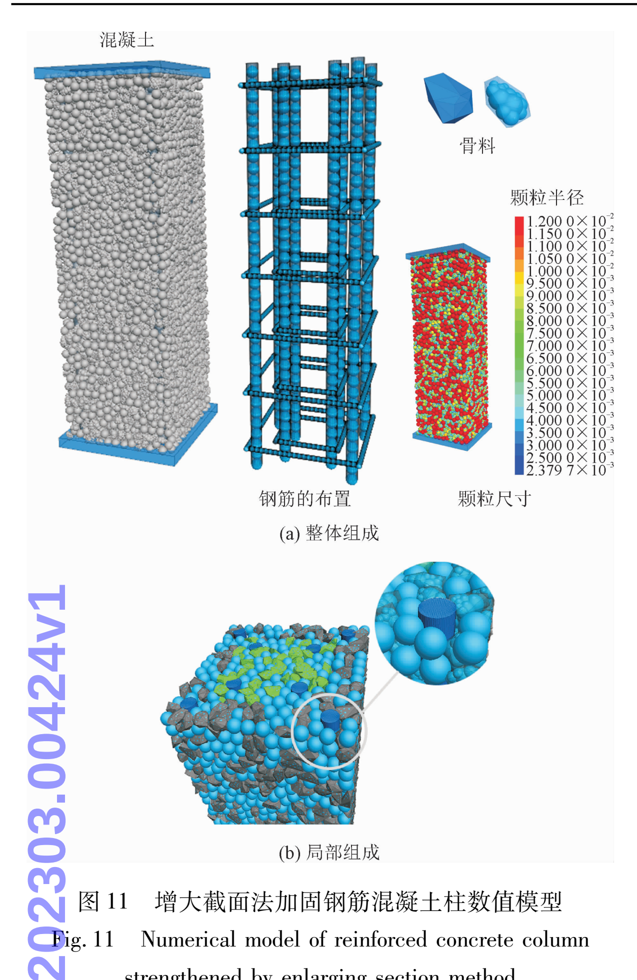


图 11　增大截面法加固钢筋混凝土柱数值模型

Fig. 11　Numerical model of reinforced concrete column strengthened by enlarging section method

与上述双剪数值试验建立单元不同，采用 Clump 单元填充。因其不规则的外形，所以界面在模型加载前的初始收敛阶段后会有一定的凹凸，类似于实际中的凿毛处理。界面处进行界面接触分区，接触本构采用平行黏结模型，填充新老混凝土界面粗糙度处理如图 12 所示。为了实现对模型中粗糙度的控制，通过改变模板填充 Bubblepack 命令中的 Distance(0 ~ 180) 和 Ratio(0 ~ 1)。考虑计算效率和硬件设施条件，这里将其分别设为 120 和 0.3。

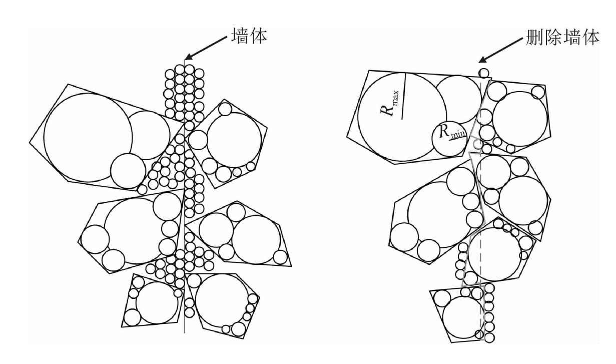


图 12　界面粗糙度示意图

Fig. 12　Interface roughness

3.1　细观力学参数选取

由于接触分组较多，赋予接触参数较多，参数之间也相互影响，平行黏结快速标定法不能完全解决，参考 Fakhimi 等[20]提出的量纲分析法，结合快速标定法，最后得出模型细观参数，见表 2。

表 2　钢筋混凝土细观参数

Tab. 2　Meso parameters of reinforced concrete

材料	有效模量/GPa	刚度比	平行黏结有效模量/GPa	平行黏结法向强度/MPa	平行黏结切向强度/MPa	平行黏结刚度比
旧柱砂浆	1	1	2	40	40	1
旧柱骨料	5	1	10	200	200	1
新柱砂浆	1.7	1	2	118	118	1
新柱骨料	5	1	10	200	200	1
钢筋	10	1	10	500	500	1

3.2　轴压力与应变曲线

对混凝土柱上下刚性加载板使用速度加载法，利用 Fish 语言对轴压力和混凝土应变关系进行数据提取，最终将模拟结果与试验结果[19]进行对比，结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出，在曲线的上升阶段，新老混凝土数值模拟结果与试验结果基本一致，此时数值模拟中新老混凝土曲线也比较吻合，说明两者在加载初期能较好地协同工作。在下降阶段，模拟段曲线呈凸型，塑性应变不断增加，软化现象较为明显；在模拟曲线上升中后段和下降段，新老混凝土模拟曲线有略微差异，说明新老混凝土在相同轴压力下会有一定的相对位移。这是因为新老混凝土黏结面为薄弱面。

3.3　损伤断裂演化

混凝土损伤裂隙演化过程如图 14 所示。通过 PFC 中的内置 Fish 语言编程来实现对颗粒间接触断

裂的实时监测，其中 DFN(discrete fracture network)为离散裂隙网格，当颗粒之间的接触力大于黏结强度时，就会生成圆盘状(二维为直线)，说明黏结材料接触断裂。当时步为 4 000 时，裂隙均匀分布于混凝土四周；随着时步的增加，裂隙逐渐密集，此时裂隙直径较小，损伤较小，如图 14(b)所示；当运行至 7 000步时，混凝土中部、上部和下部均有较大裂隙出现，但是主要集中于中下部；当时步为 8 000 时，混凝土中部内外侧面均出现较大裂隙，下部裂隙主要集中于内部；当时步为 9 000 时，混凝土中部外表面存在明显的主裂隙，说明外表面有明显的混凝土脱落，下部裂隙也愈发密集，破坏较为明显。

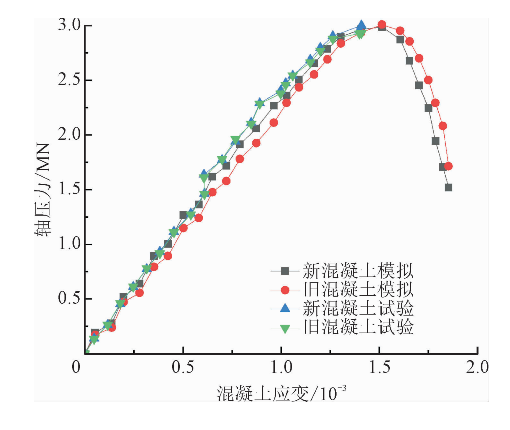


图 13 混凝土轴压力与应变曲线

Fig. 13 Axial compression and strain curve of concrete

图 14 混凝土数值模型裂隙演化过程

Fig. 14 Fracture damage evolution of numerical concrete model

4 结 论

1)对于双面剪切试验，模拟得到的剪切滑移数值曲线与试验曲线能较好地吻合；随着加载力的逐渐增大，初始裂缝出现在了加载面处的新老混凝土交界位置，裂缝沿着交界面逐渐延伸；在模型达到峰值强度后，裂缝增长速率急剧增加；最终裂缝布满交界面，形成贯通的断裂面，说明新老混凝土交界面是薄弱面。

2)利用 Clump 命令进行仿真模拟，保证与实际骨料形态特征一致，增大颗粒数量来提高模拟精度。轴压试验中，将得出的轴压力、混凝土应变关系曲线与现有试验曲线比较，抗压强度一致，并且模拟曲线给出了软化阶段，说明了本研究方法对混凝土力学特性预测的可行性。研究发现，裂缝集中于柱中下部，中部内外表面均有较大裂缝，受损严重；柱下部裂隙较小，但密集分布于内部，与试验破坏模式较为吻合。

3)PFC 软件对混凝土力学性能、破坏形态和裂

缝拓展过程的追踪有着良好的模拟效果，能有效地预测加固混凝土起始裂缝的位置及主裂缝的形态，因此可以针对起裂点处进行二次加固工作。

参考文献

[1] CUNDALL P A,STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique,1979,29(1):47-65.

[2] CUNDALL P A, HARTR D. Numerical modeling of discontinua [J]. Engineering computation,1992,9(2):101-113.

[3] 张正珺,刘军,胡文,等. 混凝土材料破坏过程的二维离散元模拟[J]. 水力发电学报,2010,29(5):23-27.(ZHANG ZhengJun, LIU Jun, HU Wen, et all. Two-dimensional simulation of concrete material fractureing by discrete element method[J]. Journal of hydroelectric,2010,29(5):23-27(in Chinese)).

[4] 许尚杰,尹小涛,马双科,等. 基于颗粒流的混凝土材料数值实验研究[J]. 实验力学,2009(3):251-258.(XU Shangjie, YIN Xiaotao, MA Shuangke, et al. Numerical test of concrete material based on particle flow cod[J]. Journal of experimental mechanics, 2009(3):251-258(in Chinese)).

[5] 赵全满,张洪亮,周浩. 基于离散元的水泥混凝土细观模拟试验[J]. 公路交通科技,2016,33(12):49-55.(ZHAO Quanman, ZHANG Hongliang, ZHOU Hao. Simulation test of cement concrete in meso-scale based on discrete element method[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 33 (12):49-55(in Chinese)).

[6] 张炜,周剑,于世伟,等. 双轴压缩下颗粒物质接触力与力链特性研究[J]. 应用力学学报,2018,35(3):531-537.(ZHANG Wei, ZHOU Jian, YU Shiwei, et al. Investigation on contact force and force chain of granular matter in biaxial compression[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018;35(3):531-537(in Chinese)).

[7] MAILI C,JING M. Experimental study on shear behavior of the interface between new and old concrete with reinforced[J]. Ksce journal of civil engineering,2018,22(5):1882-1888.

[8] CAVACO E,CAMARA J. Experimental research on the behaviour of concrete-to-concrete interfaces subjected to a combination of shear and bending moment[J]. Engineering structures,2016,132: 278-287.

[9] SANTOS P M D,JÚLIO E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete-closure[J]. Aci materials journal,2012,109 (3):389-390.

[10] 栗浩洋,姚强,华天波,等. 基于PFC3D的无砂混凝土强度及损伤模式[J]. 长江科学院院报,2019,36(6):127-132.(LI Haoyang, YAO Qiang, HUA Tianbo, et al. PFC3D-based study on strength and damage model of no-fines concrete[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2019,36(6):127-132 (in Chinese)).

[11] 康政,唐欣薇,秦川,等. 基于细观离散元的混凝土端部效应分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(12):94-98.(KANG Zheng, TANG Xinwei, QIN Chuan, et al. End effect of concrete by meso-scale discrete element modeling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2013,45(12):94-98(in Chinese)).

[12] 张璇,李之达,张志华. 基于离散元的新拌混凝土流变性能分析[J]. 武汉理工大学学报,2017,39(6):62-67.(ZHANG Xuan, LI Zhida, ZHANG Zhihua. Rheological properties analysis of fresh concrete based on discrete element method(DEM)[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2017,39(6):62-67(in Chinese)).

[13] CASTO-FILGUEIRA U,ALEJANO L R,ARZUA J,et al. Numerical simulation of the stress-strain behavior of intact granite specimens with particle flow code[J]. Rock mechanics and rock engineering,2016(8):421-426.

[14] 吕雁. 玻璃纤维混凝土弯曲疲劳性能及累计损伤研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.

[15] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[16] 邓明科,刘华政,马福栋,等. 高延性混凝土双面剪切试验及剪切韧性评论方法[J]. 复合材料学报,2020,37(2):1-11. (DENG Mingke, LIU Huazheng, MA Fudong, et al. Double shear experiment of highly ductile concrete and shear toughness evaluation method[J]. Acta materiae compositae sinica,2020,37(2):1-11(in Chinese)).

[17] 卜良桃,袁海涛. 纤维水泥砂浆与混凝土粘结性能双面剪切试验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2016,46(4):77-82.(BU Liangtao, YUAN Haitao. Experimental research on two-sided shearing bonding property of fiber cement mortar to concrete[J]. Journal of Shandong University(engineering science),2016,46(4):77-82 (in Chinese)).

[18] 赵志方,赵国藩,黄承逵. 新老混凝土粘结的拉剪性能研究[J]. 建筑结构学报,1999,20(6):26-31.(ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan, HUANG Chengkui. Research on the tension-shear behavior of the adhesion of young and old concrete[J]. Journal of building structures,1999,20(6):26-31(in Chinese)).

[19] 张祝沐. 增大截面法加固RC轴心受压短柱考虑二次受力的正截面受压承载力[D]. 福建:福州大学,2016.

[20] FAKHIMI A,VILLEGAS T. Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture[J]. Rock mechanics and rock engineering,2007,40(2): 193-211.

(编辑　黄崇亚)